中国生态农业学报 2016 年 11 月 第 24 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2016, 24(11): 1464−1472

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160555

不同耕作深度对土壤物理性状及烤烟根系空间分布特征的影响*

童文杰 邓小鹏 徐照丽 马二登 晋 艳 李军营**

(云南省烟草农业科学研究院 昆明 650021)

摘 要 为探讨不同耕作深度对烤烟产量产值的影响，揭示烟田深耕增产增效机理，以烤烟'K326'品种为材料，基于田间定位试验，设置对照翻耕 20 cm(GS20)、翻耕 30 cm(GS30)和翻耕 40 cm(GS40)3 个处理，研究不同耕作深度对烟叶产量产值、烟田土壤物理性状和烤烟根系空间分布特征的影响。结果表明：深耕措施对改良土体结构、促进土壤蓄水、优化烤烟根系构型和增加烟叶产量产值有较好效果。深耕处理显著降低亚表层 20~40 cm 土壤容重，同时显著增加该土层土壤总孔隙度和土壤毛管孔隙度。其中，与 GS20 处理相比，GS30 和 GS40 处理土壤容重分别降低 8.4%和 9.4%，总孔隙度分别提高 15.6%和 13.1%，毛管孔隙度分别提高 25.8%和 24.8%。与对照 GS20 相比，GS30 和 GS40 处理显著增加团棵期表层 0~20 cm 土壤含水量，显著增加旺长期、成熟期亚表层 20~40 cm 土壤含水量。深耕处理不仅显著增加烤烟根系绝对量，还促进根系向深层土壤生长，提高烤烟根系根深指数。其中，GS30 和 GS40 处理根系生物量鲜重分别比 GS20 高 31.2%和 89.2%，根深指数分别提高 7.6%和 4.5%。与对照 GS20 相比，GS30 和 GS40 处理烟叶产量分别提高 7.0%和 27.3%，均价分别提高 1.8%和 6.2%，上等烟比例分别提高 10.4%和 24.4%，产值分别提高 9.0%和 35.1%，其中 GS40 与 GS20 存在显著性差异。研究发现，深耕措施首先作用于土壤容重、空隙等物理结构，然后影响烟田土壤蓄水储熵，促进烤烟早生快发，优化烤烟根系空间分布构型，进而作用于地上部形态建成，最终影响烟叶产量产值。

关键词 深耕 烤烟 土壤物理性状 根系空间分布 产量产值
中图分类号: S341.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-3990(2016)11-1464-09

Effect of plowing depth on soil physical characteristics and spatial distribution of root system of flue-cured tobacco*

TONG Wenjie, DENG Xiaopeng, XU Zhaoli, MA Erdeng, JIN Yan, LI Junying**

(Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming 650021, China)

Abstract In order to explore the effects of plowing depth on yield and output of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) leaf, a field experiment was conducted, and soil physical characteristics and water content, spatial distribution of flue-cured tobacco root system as well as yield of tobacco were investigated. A flue-cured tobacco variety of 'K326' was planted with plowing depths of 20 cm (GS20, conventional tillage depth, CK), 30 cm (GS30) and 40 cm (GS40) in 2015 growing season, respectively. Leaf area and soil water content of 0−60 cm were measured after 30 days (rosette stage), 45 days (early vigorous growing stage), 60 days (later vigorous growing stage) and 75 days (early maturing stage) of transplant. Soil bulk density, total porosity, capillary porosity and non-capillary porosity after 54 day of transplant (vigorous growing stage) were investigated. Special distribution of root fresh weight after 65 days of transplant (squaring stage) was investigated too. The results showed that deep plowing had positive effect on soil structure, soil water storage, spatial distribution of flue-cured tobacco root system finally

* 云南省烟草公司项目(2015YN03, 2016YN28, 2016YN34)资助
** 通讯作者：李军营，主要从事烟草生理生化及高效栽培技术研究。E-mail: ljy1250@163.com
童文杰，研究方向为烟草栽培与耕作。E-mail: tongwenjie0716@163.com
收稿日期: 2016−06−21 接受日期: 2016−09−12

* This study was supported by the Program of Yunnan Tobacco Company (2015YN03, 2016YN28, 2016YN34).
** Corresponding author, E-mail: ljy1250@163.com
Received Jun. 21, 2016; accepted Sep. 12, 2016

enhanced the yield and output. The deep plowing significantly decreased soil bulk density, increased soil total porosity, and capillary porosity at 20–40 cm subsurface soil layer. Compared to CK (G20), GS30 and GS40 decreased soil bulk density by 8.4% and 9.4%, increased soil total porosity by 15.6% and 13.1%, and increased soil capillary porosity by 25.8% and 24.8%, respectively. The deep plowing with depths of 30 cm and 40 cm significantly increased soil moisture content at 0–20 cm surface soil layer at rosette stage and at 20–40 cm subsurface soil layer at vigorous growing and maturing stages compared to those under GS20. Furthermore, the deep plowing not only significantly increased flue-cured tobacco root weight but also promoted the root content and proportion in deep soil. Root fresh biomass weight under GS30 and GS40 was 31.2% and 89.2% higher than that under GS20, respectively. Root depth index under GS30 and GS40 was 7.6% and 4.5% higher than that under GS20, respectively. In addition, tobacco leaf yield increased by 7.0% and 27.3%, average price increased by 1.8% and 6.2%, the ratio of the first-class tobacco increased by 10.4% and 24.4%, and the output value increased by 9.0% and 35.1% under GS30 and GS40 than those under GS20, respectively. There was significant difference between GS40 and GS20. The results showed that the improved soil physical characteristics, e.g., bulk density, total porosity and capillary porosity under deep plowing could increase soil moisture content at plough layer which benefited tobacco seedling growth, and lead to an optimization of the horizontal and vertical distribution of tobacco root system. A strong root system under deep plowing directly strengthened the growth of over-ground part of tobacco. Finally the yield and output value of tobacco leaf were increased.

Keywords　Deep plowing; Flue-cured tobacco; Soil physical characteristics; Spatial distribution of root system; Yield and output

烤烟是云南省重要的经济作物，云南烤烟种植面积和产量占全国总量的 1/3 以上，在我国烟草(*Nicotiana tabacum* L.)行业中占据着重要地位。当前，西南地区农田以小动力机械 15~25 cm 浅翻耕为主，土壤耕层厚度平均为 18.2 cm，较第 2 次土壤普查时期变浅近 5 cm，与美国农田 35 cm 的耕层厚度更是相去甚远[1]。云南植烟土壤也存在类似的情况，长期单一的浅翻耕模式使该地区烟田土壤耕层明显变浅、有效耕层土壤量显著减少、土壤板结与犁底层变厚上移等耕层结构问题日益凸显[2]。耕层结构失衡严重制约烟田土壤蓄水保肥性能，影响移栽后烤烟根系早生快发，同时阻碍根系在深层土壤的分布，影响烟叶后期田间耐养性。徐天养等[3]研究指出，耕层土壤浅薄和根系发育不足是我国西南烟区烟叶质量低于国外优质烟叶的主要原因。

作物根系大小及其空间分布构型与作物对土壤水分和矿质元素的吸收能力密切相关[4–6]。深耕或深松等现代耕作模式可打破犁底层障碍，降低土壤容重，调节土壤三相比，同时增加土壤有效孔隙，提高土壤蓄水储墒性能，为作物根系生长发育创造一个水、肥、气、热相协调的耕层结构[7]。前人围绕深耕对作物的生长发育进行了广泛而深入的研究，但大多数集中在土壤理化性状改良或作物地上部生长方面[8–9]，而对深耕条件下作物地下根系的水平伸展和垂直生长的定量研究较少。根系是烟草吸收土壤水分和养分以及合成植物激素、烟碱和部分氨基酸的主要器官，是烟叶产量与品质形成的重要贡献器官，烟草根系的生长发育及空间构型与耕层土壤环境质量紧密相关[10]，但目前对这方面的定量研究鲜见报导。本文基于田间试验，研究不同耕作深度对烟田土壤理化性状、根系空间分布特征和烤烟生长发育及产量产值的影响，从烤烟根土系统角度探索烟田深耕的增产增效机理，为烤烟高效栽培提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于2015年在云南省玉溪市江川县九溪镇烤烟试验基地(24°18′N，102°38′E)进行。试验区年平均气温 14.3~16.6 ℃，年平均降水量 706.3~1 088.3 mm，年日照时数 2 075.2 h。试验区实行烤烟–水稻轮作，冬季休闲。试验地土壤类型为轻壤土，翻耕前土壤基本理化性状见表 1。

表 1　试验地土壤理化性状

Table 1　Soil physical and chemical characteristics of the experimental field

土层 Soil layer (cm)	含水量 Moisture content	容重 Bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)	pH	有机质 Organic matter ($g\cdot kg^{-1}$)	水解氮 Hydrolyzable N ($mg\cdot kg^{-1}$)	有效磷 Available P ($mg\cdot kg^{-1}$)	速效钾 Rapid available K ($mg\cdot kg^{-1}$)	全氮 Total N (%)	全磷 Total P (%)	全钾 Total K (%)	氯离子 Cl^- ($mg\cdot kg^{-1}$)
0~20	0.114	1.497	6.15	30.66	119.83	52.32	241.50	0.19	0.05	1.48	12.29
20~40	0.118	1.618	6.76	16.37	69.62	32.51	131.10	0.11	0.02	1.39	17.03

1.2 试验设计

供试材料为当地常规栽培品种'K326'。采用单因素随机区组试验，通过拖拉机液压控制铧式犁高度，设置 3 种土壤耕作深度处理：耕深 20 cm(对照, GS20)、耕深 30 cm(GS30)和耕深 40 cm(GS40)，每个处理设 3 次重复，共 9 个小区，各小区面积为 192 m^2 (9.6 m×20 m)。烤烟株行距分别为 0.5 m 和 1.2 m。3 月 23 日翻耕整地, 4 月 20 日起垄理墒打塘，垄高 25 cm。4 月 24 日移栽烟苗，移栽前拌塘穴施复合肥 300 $kg\cdot hm^{-2}$ 和钙镁磷肥 375 $kg\cdot hm^{-2}$，移栽后 10 d 兑水浇施氮钾肥 150 $kg\cdot hm^{-2}$ 和硼锌肥 3 $kg\cdot hm^{-2}$，移栽后 30 d 兑水浇施复合肥 300 $kg\cdot hm^{-2}$、氮钾肥 150 $kg\cdot hm^{-2}$ 和硫酸钾 150 $kg\cdot hm^{-2}$。移栽后 35 d 中耕培土，垄高 35 cm。病虫害防治及其他田间管理措施参照当地优质烟叶生产管理办法执行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积与产量产值

烤烟团棵期(移栽后 30 d)、旺长初期(移栽后 45 d)、旺长后期(移栽后 60 d)、成熟初期(移栽后 75 d)在各小区选定 1 棵代表性烟株进行全叶位挂牌，参照中国烟草行业标准(YC/T 142—1998)计算叶面积指数，即叶面积指数=叶长(cm)×叶宽(cm)×0.634 5/(120 cm×50 cm)。烟叶成熟后，对各小区烟叶进行单采单烤，统计烤后烟叶产量，并根据烤烟 42 级国标(GB 2635—92)对烤后烟叶进行专业化分级，确定烤烟产值、均价和上等烟比例。

1.3.2 土壤含水量

利用土钻分别在烤烟团棵期(移栽后 30 d)、旺长初期(移栽后 45 d)、旺长后期(移栽后 60 d)和成熟初期(移栽后 75 d)，在每个小区连续两株代表性烤烟之间的垄面上布置 1 个取样点，取 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 和 50~60 cm 土样，105 ℃烘干法测定土壤质量含水量，每个处理重复测定 3 次。

1.3.3 土壤物理性状

烤烟旺长期(移栽后 54 d)，在每个小区连续两株代表性烤烟之间的垄面上布置 1 个取样点，环刀法测定 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 和 50~60 cm 土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度[11]，每个处理重复测定 3 次。

1.3.4 根系空间分布

现蕾期(移栽后 65 d)，利用小立方原位根土取样器[12]，根据"3D monolith"根系分层空间取样方法[13–14]，每 10 cm 为一土层，取到 60 cm，每层以烤烟植株为中心取 9 个土块，以体积 10 cm×10 cm×10 cm 大小的土块为取样单位。人工拣出单位土块内的白色鲜活烟根，室内静水清洗后称鲜重。每个小区选定 1 棵代表性烟株进行根系小立方取样。

根深指数(cm)=∑[各层次平均深度(cm)×该层次根系干重占总根重的百分比][15]

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 处理数据与作图，用 SPSS 17.0 统计分析数据和检验显著性(显著水平为 $P<0.05$)，用 SURFER 8.0 软件进行网格化处理生成等值线图和三维线框图。

2 结果与分析

2.1 不同耕深下烤烟叶面积指数与产量产值的变化

烤烟属叶用经济作物，叶面积大小对烤烟产量有重要影响。表 2 显示，团棵期烤烟叶面积指数 GS40>GS30>GS20，不同处理间存在显著差异，该结果表明深耕措施对促进烟苗早生快发有重要意义。进入旺长期后，烤烟叶面积指数仍为 GS40>GS30>GS20，但 GS30 与 GS20 之间无显著性差异。随着生育期的推进，不同处理间叶面积指数的差异趋小。

表 2 不同耕深对不同生育期烤烟叶面积指数的影响
Table 2 Effect of different tillage depths on tobacco leaf area indexes at different growth stages

处理 Treatment	团棵期 Rosette stage	旺长初期 Early vigorous growing stage	旺长后期 Later vigorous growing stage	成熟初期 Early maturing stage
GS20	0.34±0.05c	0.61±0.09b	3.12±0.22b	4.39±0.57b
GS30	0.44±0.07b	0.77±0.11b	3.46±0.41b	4.67±0.79ab
GS40	0.57±0.11a	1.15±0.22a	4.23±0.52a	5.14±0.35a

G20、G30 和 G40 分别为耕深 20 cm(对照)、30 cm 和 40 cm 处理。同列不同字母表示各处理在 0.05 水平上差异显著，下同。G20, G30 and G40 are treatments of tillage depths of 20 cm (control), 30 cm and 40 cm. Values within the same column followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$. The same below.

从产量、均价、产值和上等烟比例等经济指标看，GS40>GS30>GS20，其中 GS40 与 GS20 之间存在显著性差异(表 3)。GS30 和 GS40 处理烤烟产值达 7.91 万元$\cdot hm^{-2}$ 和 9.81 万元$\cdot hm^{-2}$，比对照 GS20 高 9.0%和 35.1%，产量比 GS20 高 7.0%和 27.3%，均价

表 3 不同耕深对烤烟产量产值的影响
Table 3 Effect of tillage depth on tobacco yield and output

处理 Treatment	产量 Yield ($kg\cdot hm^{-2}$)	均价 Average price (¥$\cdot kg^{-1}$)	产值 Output (10^4 ¥$\cdot hm^{-2}$)	上等烟比例 Ratio of high quality tobacco (%)
GS20	2 629.5±310.4b	27.6±1.6b	7.26±0.52b	51.2±4.7b
GS30	2 814.0±340.5ab	28.1±1.7b	7.91±0.86b	56.7±10.8ab
GS40	3 346.5±180.5a	29.3±1.1a	9.81±0.23a	63.7±6.5a

比 GS20 高 1.8%和 6.2%, 上等烟比例比 GS20 高 10.4%和 24.4%。土壤深耕措施可有效提升烟叶产量与质量, 增加土地产出率。

2.2　不同耕深下烟田土壤物理性状特征

深耕措施对烟田 0~40 cm 的土壤物理性状有较好的改良效果, 其中对亚表层 20~40 cm 的改良效果优于表层 0~20 cm, 对深层 40~60 cm 基本无影响(图 1)。亚表层 20~40 cm, GS30 和 GS40 处理土壤容重分别为 1.372 g·cm^{-3}和 1.356 g·cm^{-3}, 比对照 GS20 低 8.4%和 9.4%; GS30 和 GS40 处理土壤总孔隙度和毛管孔隙度均显著高于对照 GS20, 其中总孔隙度分别比对照 GS20 高 15.6%和 13.1%, 毛管孔隙度分别比对照 GS20 高 25.8%和 24.8%。土壤物理性状特征在土壤剖面上呈递增或递减的变化趋势。其中, 土壤容重与非毛管孔隙度随土层深度的增加而增大, 土壤总孔隙度与毛管孔隙度随土层深度的增加呈下降趋势。

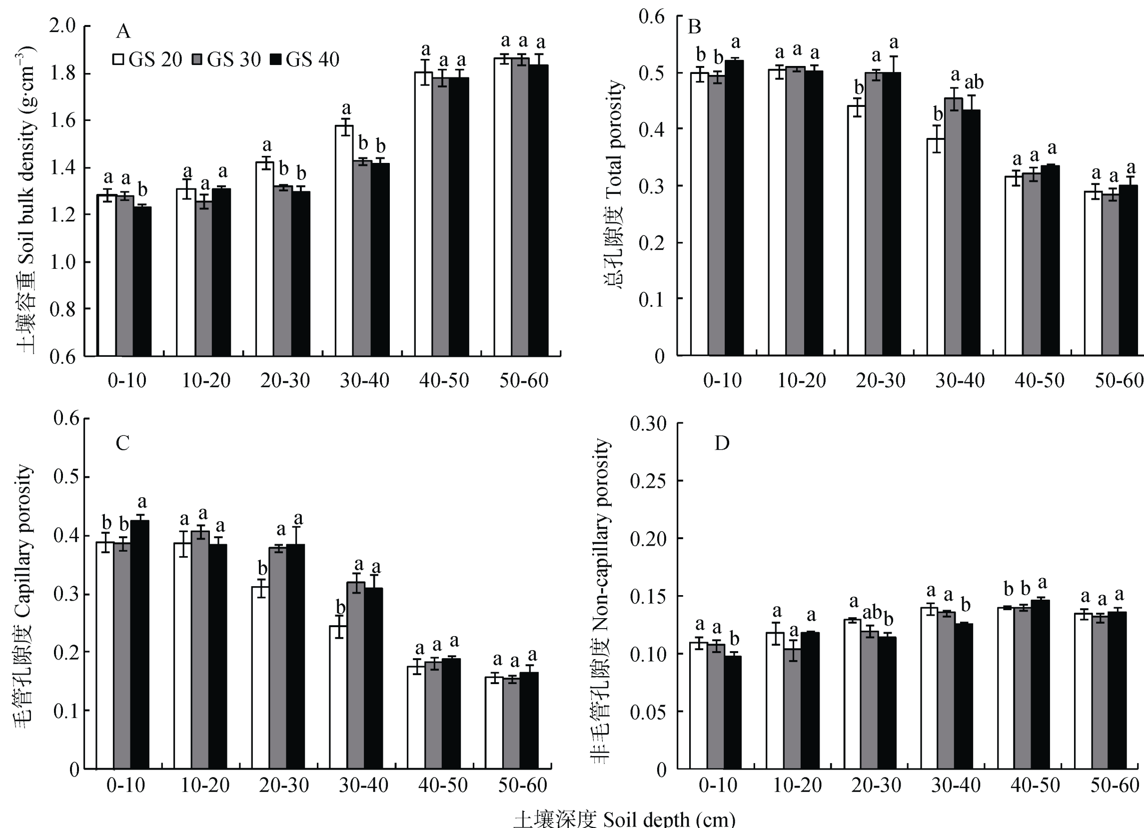


图 1　不同耕深对植烟土壤容重(A)、总孔隙度(B)、毛管孔隙度(C)和非毛管孔隙度(D)的影响

Fig. 1　Effect of tillage depth on soil bulk density (A), total porosity (B), capillary porosity (C) and non-capillary (D) porosity in tobacco field

同一土层不同字母表示各处理在 0.05 水平上差异显著。Values within the same soil layer followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$.

2.3　不同耕深下烟田土壤含水量变化

不同耕深处理对烟田土壤垂直剖面的水分分布有较大影响。除个别生育期的个别土层外, 各土层土壤含水量 GS40>GS30>GS20(图 2)。深耕措施显著增加团棵期表层 0~20 cm 土壤含水量, GS30 和 GS40 处理分别比对照 GS20 高 7.2%和 14.0%。同时深耕措施显著增加旺长前期、旺长后期和成熟初期亚表层 20~40 cm 土壤含水量, 旺长前期 GS30 和 GS40 处理土壤含水量比对照 GS20 高 7.2%和 18.7%, 旺长后期 GS30 和 GS40 处理比 GS20 高 10.2%和 24.3%, 成熟初期 GS30 和 GS40 处理比 GS20 高 17.9%和 27.8%。深耕有助于土壤蓄水。团棵期土壤含水量随土壤深度的增加而降低, 旺长初期土壤含水量随土壤深度的增加先增加后降低, 旺长后期与成熟初期各处理不同土层土壤含水量基本相近。随着烤烟生育进程的推进, 各处理 0~20 cm 土壤含水量呈下降趋势, 20~30 cm 土壤含水量先上升后下降, 各处理 30~60 cm 土壤含水量的变化趋势无明显规律。

2.4　不同耕深下烤烟根系空间分布特征

2.4.1　根系在不同土层的水平分布

不同耕深处理对烤烟根系的空间分布特征有显著影响。图 3 显示的三维线框图上表面每一个点的

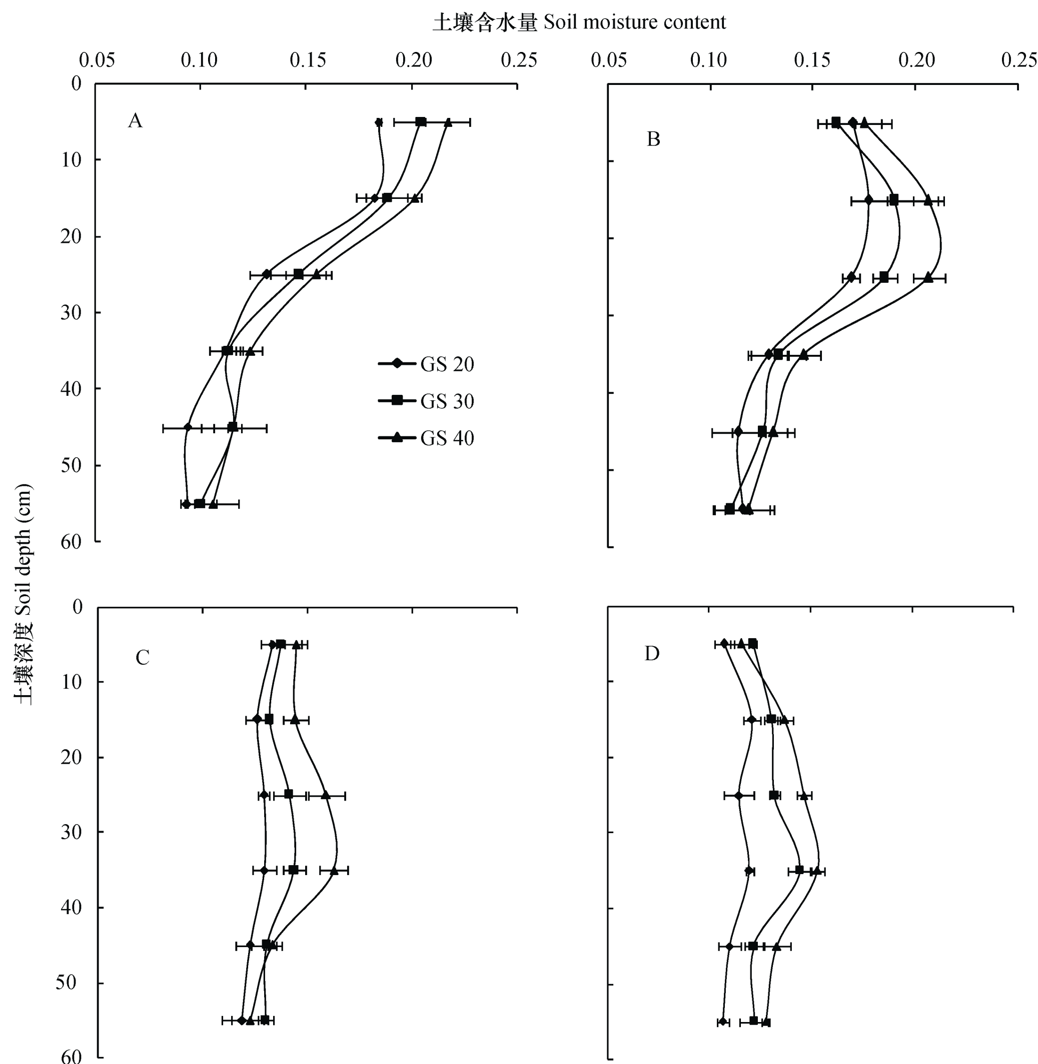


图 2 不同耕深对烤烟不同生育期土壤水分动态变化的影响(A: 团棵期; B: 旺长前期; C: 旺长后期; D: 成熟初期)
Fig. 2 Effect of tillage depth on soil moisture dynamics in tobacco field at rosette stage (A), early vigorous growing stage (B), later vigorous growing stage (C) and early maturing stage (D)

高低代表了同一土层中不同位置根系鲜重的大小。由图 3 可知，在 0~30 cm 土层，根系鲜重呈单峰值，在 30~60 cm 土层，根系鲜重呈多峰值。在 0~60 cm 土层，GS30 和 GS40 处理的根系鲜重总量分别比对照 GS20 高 31.2%和 89.2%，表明深耕处理可促进烤烟根系绝对量的增加。深耕处理对根系鲜重的影响在不同土层之间表现出差异，其中亚表层 20~40 cm 处理间的差异高于其他土层。在烤烟现蕾期，GS30 和 GS40 处理 20~30 cm 土层根系鲜重比对照 GS20 高 88.6%和 130.9%，30~40 cm 土层根系鲜重比对照 GS20 高 211.3%和 238.9%。

2.4.2 根系在土壤垂直剖面的分布

在烟田土壤 0~60 cm 垂直剖面上，烤烟根系鲜重先增大后减少(图 4)，超过 98.2%的根系分布于 0~40 cm 土层，其中 59.4%~69.3%的根系集中分别于 10~20 cm 土层。与对照 GS20 相比，GS30 和 GS40 处理的等质量分布线较宽较深，包含面积较大。GS20、GS30 和 GS40 处理根深指数分别为 16.71 cm、17.98 cm 和 17.47 cm，表明深耕处理不仅显著促进烤烟根系绝对量的增加，还促进根系向深层土壤的生长，提高下层土壤中的根系比例。

3 讨论

3.1 深耕措施对烟田土壤容重、水分等物理性状的影响

土壤耕层变浅、耕层容重增加、有效耕层土壤量减少及犁底层变厚上移等耕层结构性问题已成为我国作物高产高效的主要制约因素[16]。小动力浅翻耕农机的长期应用，增加了西南烟田的土壤容重，降低了土壤孔隙度和孔隙的连续性，破坏了土壤结构的上下均匀性，致使土壤水分、养分和氧气的交换值下降，延缓了土壤的生物过程[17]。土壤耕作是优化土壤理化性状的最普通的农业措施，能为作物地下

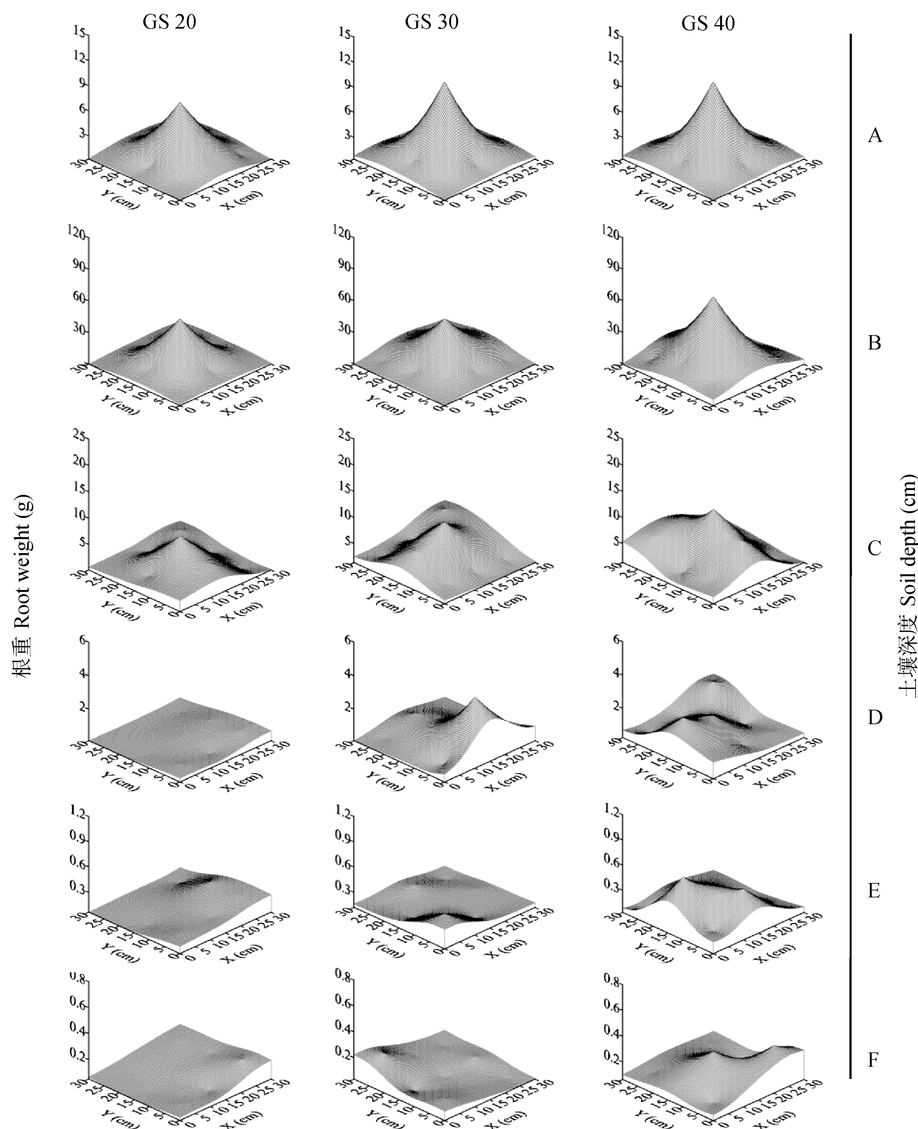


图 3　不同耕深处理下不同深度烤烟根系鲜重的空间分布(A: 0~10 cm; B: 10~20 cm; C: 20~30 cm; D: 30~40 cm; E: 40~50 cm; F: 50~60 cm)

Fig. 3　Effect of tillage depth on root spatial distribution of flue-cured tobacco in the soil at depths of 0–10 cm (A), 10–20 cm (B), 20–30 cm (C), 30–40 cm (D), 40–50 cm (E) and 50–60 cm (F)

部生长发育和地上部形态建成创造良好的生境[18]。深耕具有翻土、松土、混土、碎土的作用, 合理深耕可打破紧实犁底层的障碍[19], 使0~35 cm土层处于比较疏松的均匀状态[20], 促进根系向下伸长, 进而为作物生长与产量形成创造一个适宜的土壤环境[21]。同时, 深耕措施在增加水分入渗、降低土壤水分蒸发及增加土壤蓄水储墒等方面也有显著效果[22]。在犁底层变厚上移的土壤中, 较低的孔隙度限制了水分的上下移动, 深耕作业可打破犁底层障碍, 增加土壤有效孔隙, 改善土壤固–液–气三相比, 进而提高水分的入渗与贮存。本研究表明, 耕作深度达到 30~ 40 cm 的深耕措施可显著降低土壤亚表层 20~40 cm 的容重, 降幅为 8.4%~9.4%, 同时显著增加亚表层的土壤总孔隙度和毛管孔隙度, 增幅为 13.1%~25.8%, 对团棵期表层 0~20 cm 土壤含水量和旺长期、成熟初期亚表层 20~40 cm 土壤含水量有显著增加效果。Ji 等[23]研究表明, 在壤土地块上, 深耕显著降低了土壤的穿透阻力与土壤容重, 并显著提高土壤含水量与根长密度, 与本研究结果基本一致。烟田土壤深耕应因地制宜, 可根据熟化土层的厚度逐渐加深耕层, 切忌将心土层的生土翻入耕层。在烤烟–水稻轮作的田烟上, 同样忌一次犁得过深, 完全打破犁底层会导致水稻季漏水漏肥。

3.2　土壤物理性状对烤烟根系空间分布特征的影响

在土壤物理性状中, 土壤容重的大小反映了土壤的松紧程度, 与土壤透水性、通气性和根系伸展阻力等密切相关[24]。紧实土壤产生的机械阻力使根

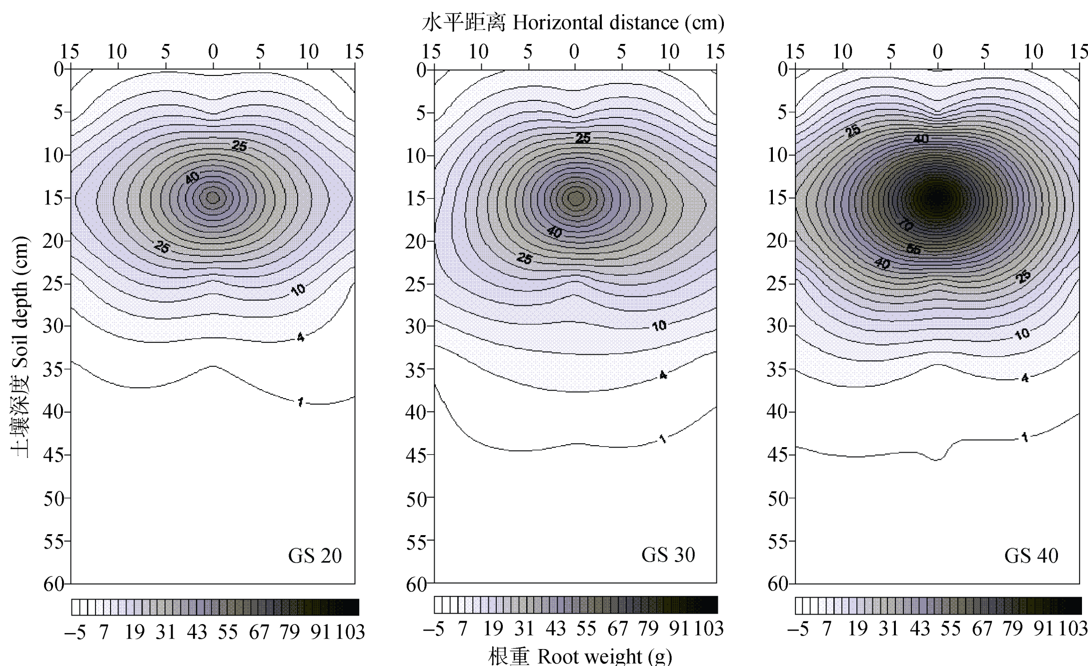


图 4 不同耕深处理下烤烟根系鲜重在土壤垂直剖面的分布

Fig. 4 Effect of tillage depth on root vertical distribution of flue-cured tobacco in the soil

区分生组织细胞分裂速度减慢，细胞长度缩短，进而影响根系在土壤中的生长和伸展，导致作物根系变短变粗，限制根系在深层土壤的有效分布，降低根系对水分养分的吸收[25–26]。土壤孔隙是土壤水分、养分、空气和微生物等的迁移通道、贮存库和活动场所。土壤总孔隙度越大，说明土壤结构越疏松，通气性越好，越有利于植物根系伸展分布[13]。毛管孔隙是土壤水分贮存和水分运移相当强烈的地方，毛管孔隙度越大，土壤的持水保水性能越强，越有利于根系吸收充足的水分与养分[27]。本研究结果显示，与对照 GS20 相比，GS30 和 GS40 处理可显著增加亚表层 20~40 cm 的烤烟根系生物量，增长幅度分别为 103.5%和 144.0%，这可能与深耕措施有效改良了 20~40 cm 土壤容重、总孔隙度和毛管孔隙度等土壤物理性状有关。前人研究表明，深耕深松等耕作措施可打破土壤犁底层，对下层土壤起到通气的作用，促进根系向深层土壤伸长，增加一级侧根和不定根的数量，提高根系对深层土壤水分养分的利用，进而提高作物产量[2]。

在根–土系统中，根系的发育是一个不断对外界响应并动态调整的过程，与土壤容重、土壤水分养分分布等密切相关[28]。根系是作物吸收水分的重要器官，为能接触吸收到更多的水分，根系必须向湿润土壤中伸长，深层土壤中高的水分入渗量和储存量可促进作物根系的垂直生长[29]。本研究结果表明，深耕措施可显著增加烤烟团棵期表层 0~20 cm 土壤含水量，对促进烤烟早生快发有一定作用；同时深耕措施显著增加了烤烟旺长期和成熟期亚表层 20~40 cm 土壤含水量，这有助于烤烟根系的向下生长，提高烤烟根深指数，缓解上层土壤根系的拥挤度，对优化根系在土壤垂直剖面的分布有重要意义。

3.3 烤烟根系空间分布特征对地上部生长发育的影响

作物根系大小及空间构型决定着作物探寻吸收土壤动态多变资源的能力，包括对可移动和不可移动资源的汲取，对土壤空间、水分及养分的竞争等[30]。在农业耕作措施的影响与地上部生长发育的变化之间，根系系统起到了桥梁纽带的作用，土壤耕作措施首先影响土体结构特征与水分养分含量，然后影响根系的生长发育、空间分布和生理活性，进而作用于地上部形态建成，最终影响到作物产量和品质[31]。根系群体发达、分布较深较广是作物群体高光效高产量高品质的基础，根系向深层土壤的扩展，有利于对深层土壤水分和养分的吸收，利于提高根系活力、延缓根系衰老，保持根系对地上部营养和水分供给[32]。本研究结果表明，深耕措施对提升烟叶产量、均价、上等烟比例和产值均具有一定影响，这可能与深耕措施改善了烟田土壤质量，优化了烤烟根系空间分布，促进烤烟对水肥的吸收有关。

4 结论

耕作措施对根土系统及作物高产高效的影响是

近年来的研究热点。本研究表明: 深耕处理对改善西南烟田土壤物理性状、优化烤烟根系空间分布、提高烟叶产量产值有较好效果。深耕措施可显著降低亚表层(20~40 cm)土壤容重, 同时显著增加土壤总孔隙度和毛管孔隙度。与常规耕作对比, 深耕处理显著增加团棵期表层 0~20 cm 土壤含水量, 有利于移栽后烤烟的早生快发。此外, 深耕处理对增加烤烟地下部根系生物量, 优化根系空间构型, 提高根系根深指数和提高烟叶产量产值均有较好的促进作用。

由此可知, 深耕措施是适宜西南地区田烟生产的一种耕作方法。但在生产应用上应做到因地制宜, 要根据原有耕层熟化土壤的厚度逐渐加深耕层, 切忌将心土层的生土翻入耕层。在烤烟–水稻轮作的田烟上, 不能一次性犁得过深, 如果完全打破犁底层会导致水稻季漏水漏肥。本研究对深入认识烟田深耕作用机理、科学进行烟田耕作有一定指导意义。

参考文献 References

[1] 张世煌, 李少昆. 国内外玉米产业技术发展报告—2009年[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2010: 111−113
Zhang S H, Li S K. Report of Corn Industry Development in China and Abroad[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2010: 111−113

[2] 王娜, 兰建强, 王定伟, 等. 不同耕作深度对烤烟生长及产、质量的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27(4): 1737−1740
Wang N, Lan J Q, Wang D W, et al. Effect of different plowing depths on growth-development, yield and quality of flue-cured tobacco[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27(4): 1737−1740

[3] 徐天养, 赵正雄, 李忠环, 等. 耕作深度对烤烟生长、养分吸收及产量、质量的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(7): 1364−1368
Xu T Y, Zhao Z X, Li Z H, et al. Effect of tilling depth on growth, nutrient uptake, yield and quality of flue-cured tobacco plant[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(7): 1364−1368

[4] Lynch J P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops[J]. Plant Physiology, 2011, 156(3): 1041–1049

[5] Pagès L. Links between root developmental traits and foraging performance[J]. Plant, Cell & Environment, 2011, 34(10): 1749–1760

[6] 张喜英. 提高农田水分利用效率的调控机制[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 80−87
Zhang X Y. Regulating mechanisms for improving farmland water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 80−87

[7] 曹庆军, 姜晓莉, 杨粉团, 等. 深松条件下春玉米花后衰老过程中根系生物学变化特征[J]. 玉米科学, 2014, 22(5): 86−91
Cao Q J, Jiang X L, Yang F T, et al. Changes of root biologic properties during senescence after anthesis of spring maize under subsoiling treatment[J]. Journal of Maize Sciences, 2014, 22(5): 86−91

[8] Jabro J D, Iversen W M, Stevens W B, et al. Physical and hydraulic properties of a sandy loam soil under zero, shallow and deep tillage practices[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 159: 67–72

[9] Gronle A, Lux G, Böhm H, et al. Effect of ploughing depth and mechanical soil loading on soil physical properties, weed infestation, yield performance and grain quality in sole and intercrops of pea and oat in organic farming[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 148: 59–73

[10] Bogunović I, Kisić I, Jurisić A. Soil compaction under different tillage system on Stagnic Luvisols[J]. Agriculturae Conspectus Scientificus, 2014, 79(1): 57−63

[11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 512−514
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analyses[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978: 512−514

[12] 赵明. 作物产量性能与高产技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 304−308
Zhao M. The Crop Yield Performance and High Yield Technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 304–308

[13] 王新兵, 侯海鹏, 周宝元, 等. 条带深松对不同密度玉米群体根系空间分布的调节效应[J]. 作物学报, 2014, 40(12): 2136−2148
Wang X B, Hou H P, Zhou B Y, et al. Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(12): 2136−2148

[14] 查丽, 谢孟林, 朱敏, 等. 垄作与覆膜对川中丘陵春玉米根系分布及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 855−862
Zha L, Xie M L, Zhu M, et al. Effects of ridge-cultivation and plastic film mulching on root distribution and yield of spring maize in hilly area of central Sichuan basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 855−862

[15] 唐拴虎, 徐培智, 张发宝, 等. 一次性全层施用控释肥对水稻根系形态发育及抗倒伏能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 63−69
Tang S H, Xu P Z, Zhang F B, et al. Influence of single basal application controlled-release fertilizer on morphologic development of root system and lodging resistance of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(1): 63−69

[16] 王崇桃, 李少昆. 玉米生产限制因素评估与技术优先序[J]. 中国农业科学, 2010, 43(6): 1136−1146
Wang C T, Li S K. Assessment of limiting factors and techniques prioritization for maize production in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(6): 1136−1146

[17] Whalley W R, Dumitru E, Dexter A R. Biological effects of soil compaction[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 35(1/2): 53−68

[18] Xu D, Mermoud A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 60(1/2): 11–19
[19] Munkholm L J, Schjønning P, Rasmussen K J. Non-inversion tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 62(1/2): 1−14
[20] Birkás M, Jolánkai M, Gyuricza C, et al. Tillage effects on compaction, earthworms and other soil quality indicators in Hungary[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 78(2): 185–196
[21] Borghei A M, Taghinejad J, Minaei S, et al. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance and cotton yield in northwest of Iran[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2008, 10: 120–123
[22] Lampurlanés J, Angás P, Cantero-Martínez C. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions[J]. Field Crops Research, 2001, 69(1): 27–40
[23] Ji B, Zhao Y, Mu X, et al. Effects of tillage on soil physical properties and root growth of maize in loam and clay in central China[J]. Plant Soil and Environment, 2013, 59(7): 295–302
[24] Hope G D. Effects of Mechanical Site Preparation on Soil and Foliar Nutrients in the Drier Subzones of the IDF, MS and ESSF Zones-Project 3.50[M]. Victoria BC: Res. Dev. Agree. Res., 1991: 193
[25] Bécel C, Vercambre G, Pagès L. Soil penetration resistance, a suitable soil property to account for variations in root elongation and branching[J]. Plant and Soil, 2012, 353(1/2): 169–180
[26] 侯鹏, 陈新平, 崔振岭, 等. 4 种典型土壤上玉米产量潜力的实现程度及其因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 874–881
Hou P, Chen X P, Cui Z L, et al. Potential maize yield realization and related driving factors in four typical soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 874–881
[27] 张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3685−3695
Zhang X B, Shangguan Z P. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau[J]. Acta Ecological Sinica, 2006, 26(11): 3685−3695
[28] Whalley W R, Watts C W, Gregory A S, et al. The effect of soil strength on the yield of wheat[J]. Plant and Soil, 2008, 306(1/2): 237–247
[29] Muñoz-Romero V, López-Bellido L, López-Bellido R J. The effects of the tillage system on chickpea root growth[J]. Field Crops Research, 2012, 128: 76–81
[30] Smith S, De Smet I. Root system architecture: Insights from *Arabidopsis* and cereal crops[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2012, 367(1595): 1441–1452
[31] 朱献玳, 陈学留, 刘益同, 等. 玉米根系的生长及其在土壤中的分布[J]. 莱阳农学院学报, 1991, 8(1): 15−19
Zhu X D, Chen X L, Liu Y T, et al. Root growth and distribution in soil of maize[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 1991, 8(1): 15−19
[32] 王空军, 郑洪建, 刘开昌, 等. 我国玉米品种更替过程中根系时空分布特性的演变[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 472−475
Wang K J, Zheng H J, Liu K C, et al. Evolution of maize root distribution in space-time during maize varieties replacing in China[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2001, 25(4): 472−475